

На правах рукописи



ГАДИЕВ РАДИК МАНСАФОВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ ВДОЛЬ ГРАНИЦЫ
РАЗДЕЛА ДВУХ ОРГАНИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в Институте физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской Академии наук.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
профессор,
Лачинов Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор,
Никитенко Владимир Роленович
Доктор физико-математических наук,
Германенко Александр Викторович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Башкирский государственный университет»

Защита состоится «12» мая 2011г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им.А.М.Горького» по адресу:

620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М.Горького».

Автореферат разослан «8» апреля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, с.н.с.



Кудреватых Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Основным ограничением для массового применения органических полимеров в качестве материалов для активных элементов электронных устройств является низкая подвижность носителей зарядов. Это связано с особенностями строения и спецификой физических механизмов транспорта носителей заряда в органических материалах с π -сопряжением валентных электронов. Предполагается, что такие полимеры представляют собой электронно-неоднородную систему, в которой области полисопряжения, характеризующиеся металлической проводимостью, разделены диэлектрическими участками. Перенос носителей через диэлектрические прослойки и является активационным барьером, ограничивающим транспортные свойства. В результате, подвижность носителей в проводящих полимерах значительно ниже, чем в неорганических полупроводниках, в связи с этим рабочие частоты устройств полимерной электроники смещены в сторону диапазона низких частот. К тому же временная стабильность полупроводящих полимеров намного хуже неорганических аналогов. Исследования, направленные на увеличение подвижностей носителей зарядов в полимерных материалах сейчас в основном ведутся в двух направлениях. Это поиск новых материалов и разработка новых методов допирования. Второе направление - оптимизация уже существующих устройств на основе полимеров. Однако существенных улучшений электронных параметров органических материалов не наблюдается. В связи с этим, представляется актуальным поиск новых подходов к формированию электронной структуры и новых физических явлений для решения фундаментальных проблем транспорта носителей заряда в органических материалах.

Одним из возможных решений данной проблемы, является использование эффектов размерного квантования, которые позволяют реализовать новые электронные свойства, существенно отличающиеся от свойств объемных

массивных материалов. Одним из перспективных направлений современной твердотельной электроники признано использование свойств электронного газа, находящегося в квантовой яме. Использование такого подхода к органическим полимерным материалам представляется чрезвычайно актуальным.

Цель работы. Диссертационное исследование посвящено экспериментальному исследованию особенностей транспорта носителей заряда вдоль границы раздела двух органических диэлектриков.

Для осуществления указанной цели решались следующие задачи:

1. Разработка методики изготовления образцов для исследования транспорта носителей зарядов вдоль границы раздела двух полимерных пленок
2. Исследование электрофизических свойств интерфейса различными методами при различных температурах и различных материалах электродов.
3. Исследование влияния химической структуры полимеров на электрофизические свойства границы раздела.
4. Исследование влияния электрического поля и внешних воздействий на транспорт носителей зарядов вдоль интерфейса.
5. Экспериментальная оценка возможностей практического применения полученных результатов.

Научная новизна.

Установлена возможность формирования транспортного слоя вдоль границы раздела двух полимерных пленок, обладающего аномально высокой проводимостью и подвижностью носителей зарядов.

Обнаружена металлоподобная температурная зависимость проводимости границы раздела двух полимерных диэлектриков.

Продемонстрирована определяющая роль структуры используемого полимера, в частности, наличие боковых фрагментов с большим дипольным моментом.

Обнаружена полевая зависимость параметров носителей заряда вдоль границы раздела полимерных пленок

Защищаемые положения:

1. Вдоль интерфейса, сформированного на границе раздела двух пленок широкозонных функциональных полимеров, формируется слой, обладающий проводимостью «металлического» типа.
2. Высокая электропроводность вдоль границы раздела возникает за счет двумерной электронной системы сформированной слоем ориентированных на поверхности боковых фталидных групп с большим дипольным моментом.
3. Электрофизическими свойствами границы раздела можно управлять в широком диапазоне параметров при помощи электрического поля или прочих внешних воздействий.

Практическая ценность работы заключается в том, что продемонстрирован метод повышения подвижностей носителей зарядов в полимерных материалах, путем создания двумерной области вдоль границы раздела двух полимерных материалов. Полученная таким образом система может быть использована в качестве транспортного канала высокочастотного полевого транзистора или чувствительного элемента химических и биологических сенсоров.

Достоверность результатов обеспечивается использованием в работе надежных, неоднократно апробированных экспериментальных методов; использованием при интерпретации результатов современных представлений физики конденсированного состояния.

Публикации и апробации работы. По теме диссертации опубликованы 19 работ, из которых 7 статей в рецензируемых научных журналах, 12 работ в сборниках научных конференций. Основные результаты работы были апробированы на различных международных и российских конференциях, в частности, VI International Conference on Molecule Electronics ELECMOL'10 December 8–12, 2010 Grenoble; VII Международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники", Санкт-Петербург, 2010; Materials of International conference "Functional materials" ICFM – 2009, Ukraine, Crimea, Portenit 2009; IX Российская конференция по физике полупроводников

«Полупроводники 09», Новосибирск – Томск 2009; IV International Conference on Molecule Electronics ELECMOL'08, Grenoble, 2008; «Нелинейные и резонансные явления в конденсированных средах», Уфа, 2009; VI Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» - С.- Петербург, 2008; XI Международная конференция «Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2008), Санкт–Петербург, 2008; IX Молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС – 9), Екатеринбург, 2008; V Уральская региональная научно-практическая конференция Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников и источников света, Саранск, 2007 и др.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, литературного обзора, трех глав, выводов и списка литературы. Общий объем работы составляет 144 страницы, в том числе 67 иллюстраций. Библиография включает 190 названий.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, определены конкретные научные задачи.

В первой главе представлен литературный обзор современного состояния физики низкоразмерных систем с двумерной делокализацией электронов вдоль границы раздела двух диэлектрических материалов. Рассмотрены некоторые электрофизические особенности таких систем. Представлены основные модели формирования и особенностей переноса зарядов вдоль границы раздела неорганических и органических диэлектриков. Обсуждена проблема строения поверхности полимерных диэлектриков.

Во второй главе приведены характеристики объектов исследований, способы изготовления образцов, методики проведения измерений, а так же анализ ошибок измерений.

В параграфе 2.1. описывается основной объект исследования – полидифениленфталид (ПДФ). Представлены основные электрофизические свойства органического материала, так же представлены эффекты, обнаруженные в тонких пленках этого класса полимеров.

В параграфе 2.2. описывается методика изготовления экспериментальных образцов. Для измерения проводимости вдоль границы раздела полимер/полимер образцы готовились следующим образом. На стеклянную подложку методом центрифугирования наносилась полимерная пленка. Затем методом термического вакуумного напыления через теневую маску наносились металлические электроды. В качестве материалов для электродов использовались металлы с разной работой выхода: медь, алюминий, золото, серебро и хром. Верхний полимерный слой также наносился методом центрифугирования. Образцы, изготавливаемые для измерения проводимости структуры четырехзондовым методом, отличались количеством электродов. Для исследования возможности управления проводимостью границы раздела при помощи внешнего поля, изготавливались структуры типа «полевой транзистор».

В параграфе 2.3. описана методика измерения вольтамперных характеристик при различных температурах. Представлено описание экспериментальной ячейки.

В параграфе 2.4. приведена методика измерения зависимостей вольтамперных характеристик от влажности. Представлено описание экспериментальной ячейки.

В параграфе 2.5. описана методика измерения проводимости четырехзондовым методом для образцов произвольной формы.

В параграфе 2.6. описана методика измерения влияния внешнего поля на проводимость структур. Измерения проводились по схеме с общим истоком.

В параграфе 2.7. описан метод атомно-силовой микроскопии использованный для определения размеров интерфейсной области.

В параграфе 2.8. приведен анализ ошибок измерений, оценены погрешности измерений и величины доверительных интервалов.

В третьей главе описаны результаты исследования электрофизических свойств структур содержащих границу раздела двух полимерных пленок, описано влияния материалов электродов, приведены температурные зависимости проводимости измеренные двух- и четырехзондовыми методами.

В параграфе 3.1 представлены вольт- амперные характеристики (ВАХ) экспериментальных структур и проведены оценки вклада различных видов интерфейсов в итоговую проводимость. На основе полученных результатов установлено, что самая высокая проводимость соответствует образцу, содержащему границу раздела полимер/полимер (рис. 1б). После напыления электродов на поверхности первой пленки (рис. 1в) удельное сопротивление составило $\rho \sim \cdot 10^7$ Ом·см (рис.1а, кривая 2); после нанесения второго полимерного слоя (рис. 1б) удельное сопротивление уменьшалось до $\rho \sim 10^3$ Ом·см (рис. 1а, кривая 1).

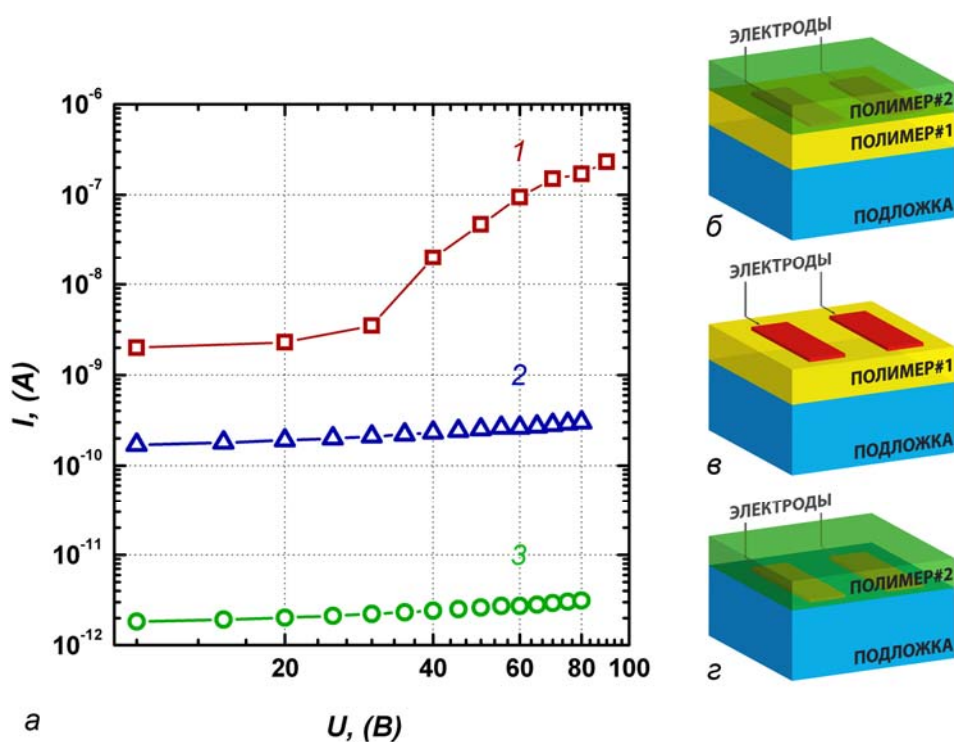


Рисунок 1. Сравнение ВАХ (а) трех типов интерфейсов: (б) полимер/полимер; (в) полимер/воздух; (г) полимер/подложка.

В случае интерфейса полимер/подложка (рис. 1г) сопротивление составило $\rho \sim \cdot 10^8$ Ом·см (рис. 1 а, кривая 3). Из полученных результатов, можно сделать вывод, что на границе раздела двух полимерных пленок, формируется структура с уникальными электрофизическими свойствами. В частности, удельное сопротивление такой структуры на 4-5 порядка меньше сопротивления объемного материала и ее поверхности.

Так же, было рассмотрено влияние материалов электрода на свойства границы раздела. Для этого измерялись ВАХ образцов с различными материалами электродов. Было обнаружено, что в рассматриваемой системе материал электрода играет важную роль. Полученные ВАХи были интерпретированы в рамках инжекционной модели. Была проведена оценка подвижности носителей согласно формуле:

$$\mu = \frac{JL^3}{\theta \epsilon \epsilon_0 U_1^2} \quad (1)$$

Подвижность носителей заряда, рассчитанная согласно формуле (1) составила $\mu \sim 3.7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, в случае медных электродов и $\sim 0.15 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в случае золотых электродов. Полученные значения являются чрезвычайно высокими для органических материалов и почти на пять порядков превышает объемную подвижность, измеренную для ПДФ времяпролетным методом ($\mu \sim 10^{-6} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$).

Было сделано предположение, что основным механизмом переноса на контакте металл/полимер является термоэлектронная эмиссия Шоттки.

В параграфе 3.2.

Представлены результаты исследования ВАХ для образцов с различными материалами электродов в температурном диапазоне от 90К до 300 К. На основе полученных данных были построены зависимости проводимости структур от обратной температуры. Эти зависимости можно разделить на две линейные области с разными углами наклона к оси абсцисс. Это может означать, что зависимость от температуры носит экспоненциальный характер с разными энергиями активации при разных температурах. Можно

предположить, что при относительно высоких температурах ток через контакт полимер/металл обусловлен термоэлектронной эмиссией Шоттки. Это предположение подтверждается зависимостями, построенными в координатах: $\ln(I/T^2) - 1000/T$ при различных напряжениях на образце. Полученные экспериментальные точки для образца с любым материалом электродов при температурах выше $\sim 230\text{K}$ аппроксимируются прямолинейными участками (рис. 2б). При низких температурах, основным транспортом становится туннельная эмиссия облегченная полем.

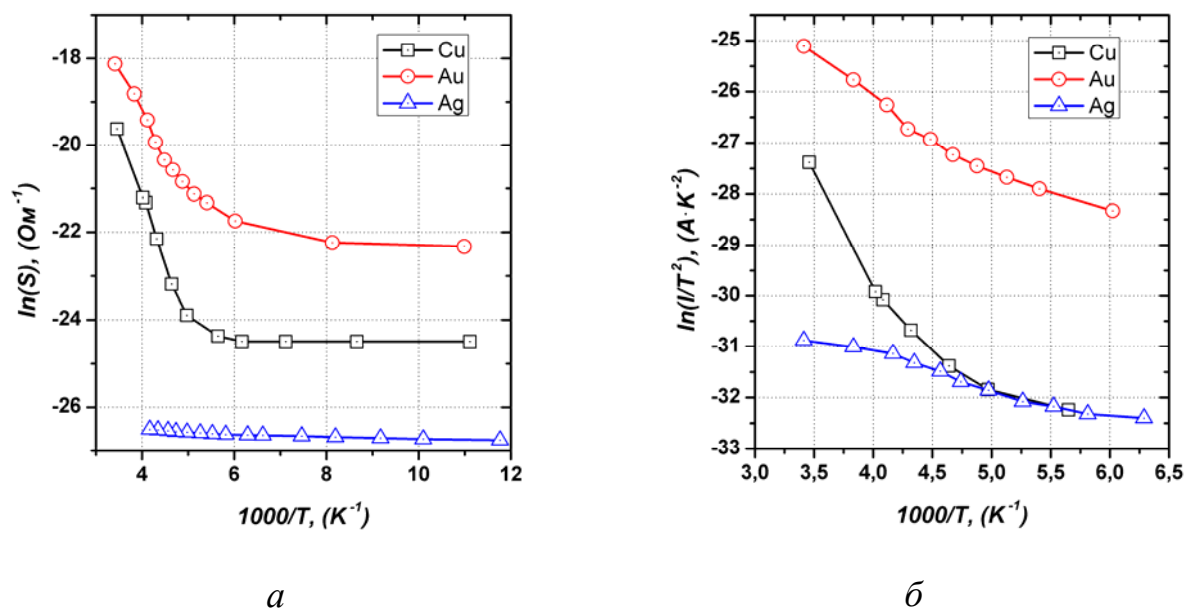


Рисунок 2. (а) Температурные зависимости проводимости для различных металлов; (б) Зависимости в координатах Шоттки.

В параграфе 3.3 представлены результаты оценки реальной проводимости структуры и ее температурной зависимости с использованием четырехзондового метода Ван-дер-Пау.

При измерении двухзондовым методом, с уменьшением температуры наблюдается снижение величины удельной проводимости. Это связано с уменьшением инжекционного тока при уменьшении температуры. Температурная зависимость проводимости, измеренная четырехзондовым методом, имеет кардинально другой характер. На всем участке кривой

наблюдается увеличение удельной проводимости на 4 порядка с уменьшением температуры (рис. 3).

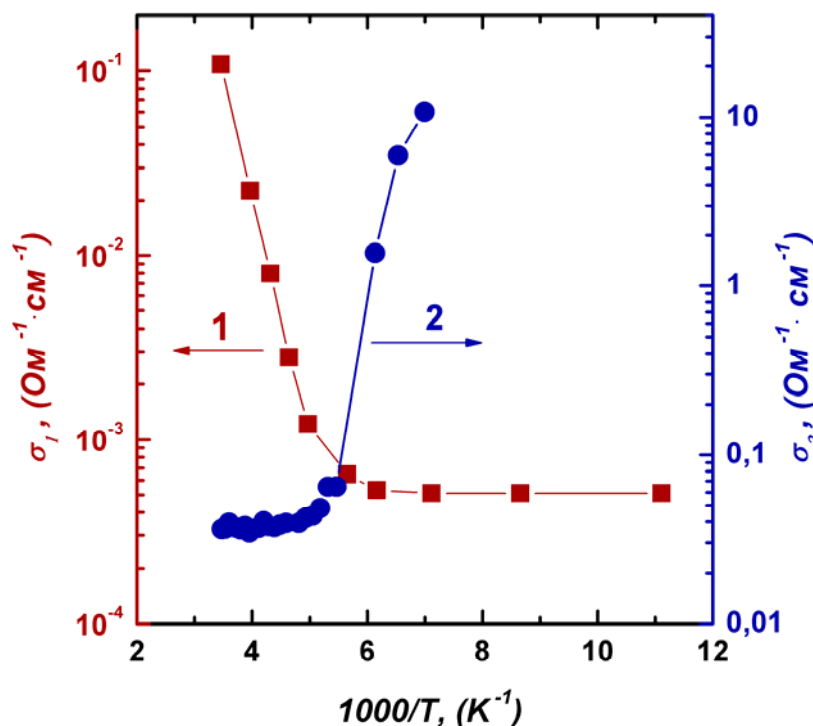


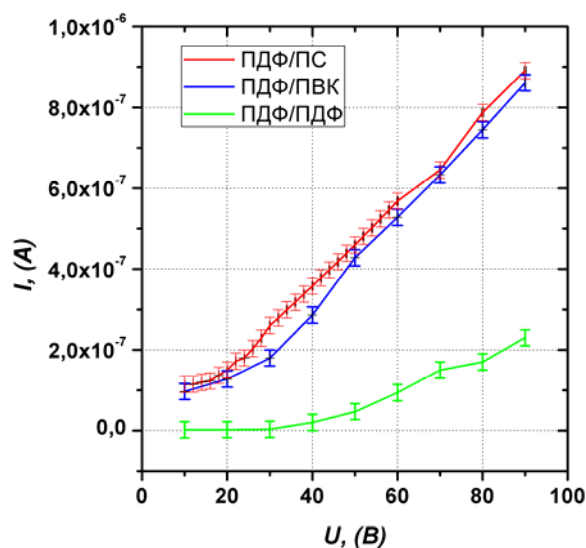
Рисунок 3. Температурная зависимость удельной проводимости структуры измеренная двухзондовым (кривая 1) и четырехзондовым (кривая 2) методом Ван-дер-Пау

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния структуры полимера на электрофизические свойства интерфейса двух полимерных диэлектриков.

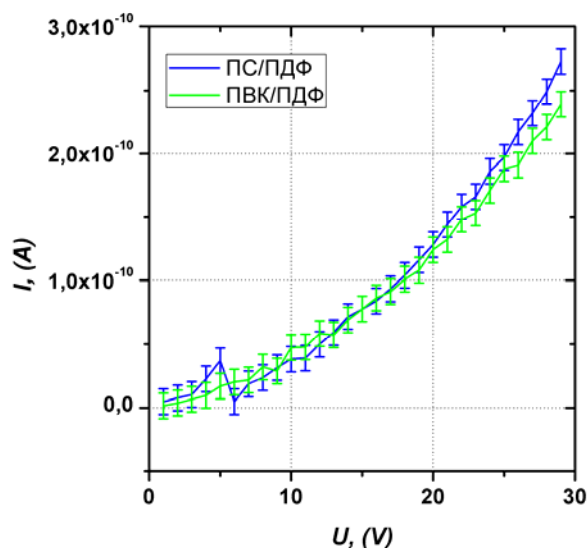
В параграфе 4.1 представлены результаты исследования структуры интерфейса двух полимерных пленок методами АСМ. Была визуализирована область контакта двух пленок и получены предварительные размеры исследуемой области. Размеры области контакта лежали в диапазоне от 9 нм до 15 нм.

В параграфе 4.2 представлены результаты исследования влияния строения полимера на свойства интерфейса. Для этого были изготовлены различные конфигурации образцов с использованием различных полимеров, кроме полидифениленфталида использовались полистирол и

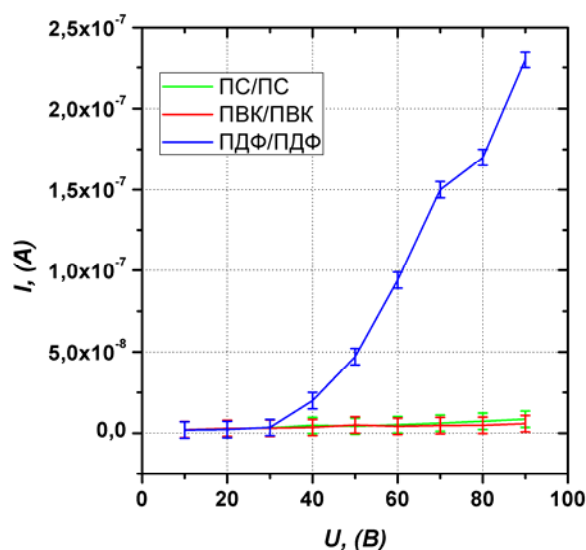
поливинилкорбазол. Типичные ВАХ для всех типов структур и различных материалов представлены на рисунке 4.



а



б



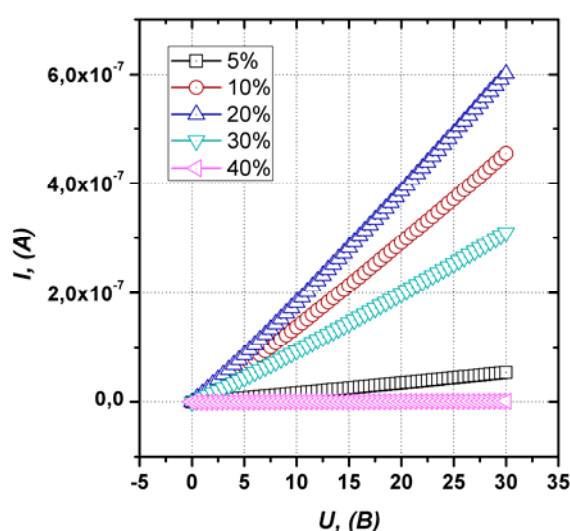
в

Рисунок 4. (а) ВАХ образцов с использованием ПДФ в качестве первого полимерного слоя и различными полимерами в качестве второго слоя (ПС, ПВК, ПДФ); (б) ВАХ образцов с использованием ПДФ в качестве второго полимерного слоя; (в) ВАХ образцов с использованием одного и того же материала в качестве первого и второго слоя;

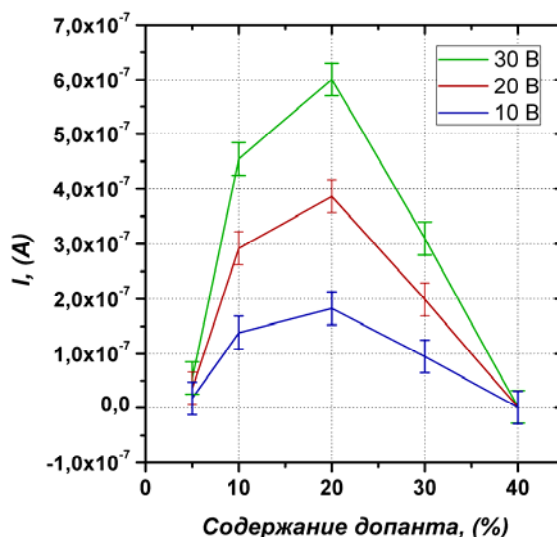
Анализ полученных результатов показывают, что наиболее сильное увеличение проводимости наблюдается в структурах, в которых ПДФ использовался для формирования первой полимерной пленки. По-видимому, определяющим фактором при формировании проводящего интерфейса является, во-первых, материал, использующийся для формирования первой пленки, во-вторых, молекулярная и электронная структура поверхности этой пленки.

В параграфе 4.3 представлены результаты исследования влияния концентрации боковых фталидных групп на свойства интерфейса.

Для проверки гипотезы, о влиянии боковых фталидных групп на формирование области с высокой проводимостью на границе раздела двух полимерных пленок, были изготовлены растворы полимера, содержащие различные массовые доли примеси или допанта. В качестве допанта использовалась – 3,3 дифенил 4,4 – дикарбоновая кислота. Растворы имели концентрации 5%, 10%, 20%, 30% и 40% массовой доли кислоты от массы сухого вещества в растворе. Аналогично структурам, рассмотренным в параграфе 4.2, были изготовлены образцы двух типов: а) первый слой - пленки, отлитые из растворов с различным содержанием добавок, второй слой – ПДФ без добавок; б) первый слой ПДФ без добавок, второй слой пленки, отлитые из растворов с различным содержанием добавок. Остальные параметры оставались неизменными. Материал электродов - медь, расстояние между электродами 30 мкм. Типичные ВАХ структур представлены на рисунках 5 и 6 для типов а) и б) соответственно.

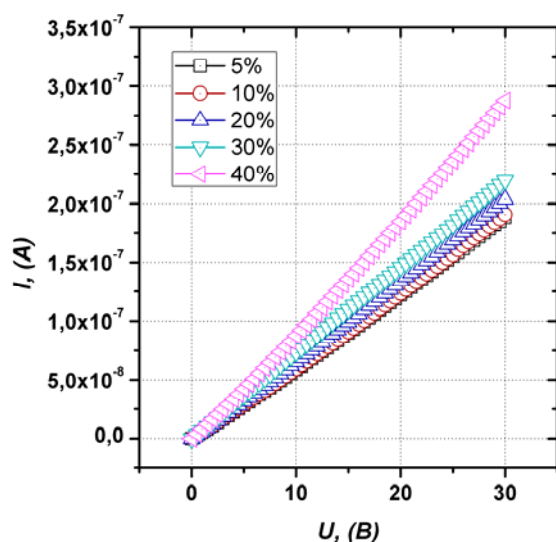


а

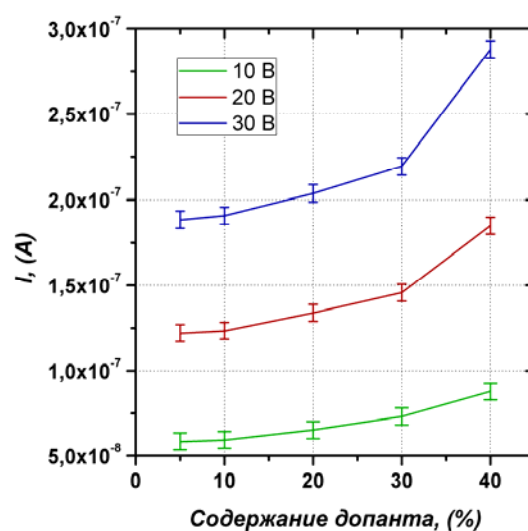


б

Рисунок 5. а) ВАХ структур, с различным содержанием допанта в растворе, из которого отливался первый слой полимера; б) Зависимость величины тока протекающего через интерфейс, с различным содержанием допанта в первой пленке, при одинаковых значениях напряжений.



а



б

Рисунок 6. а) ВАХ структур, с различным содержанием допанта в растворе, из которого отливался второй слой полимера; б) Зависимость величины тока протекающего через интерфейс, с различным содержанием допанта во второй пленке, при одинаковых значениях напряжений.

Обнаружено, что при использовании допированного полимера для первого слоя, проводимость структуры увеличивается с ростом числа частиц допанта до определенной концентрации $\sim 20\%$, дальнейший рост содержания допанта приводит к снижению проводимости. Что видимо, связано с нарушением принципа плотной упаковки молекул и качества поверхности первого слоя, при больших концентрациях молекул допанта.

В случае если допированный полимер использовался для формирования второй пленки, наблюдался плавный рост проводимости с увеличением концентрации допирующего вещества. Что, по-видимому, связано с увеличением вязкости раствора, приводящему к лучшему сохранению структуры поверхности первой пленки.

В пятой главе рассматривается влияние внешних полей и других сторонних факторов на электрофизические свойства системы.

В параграфе 5.1 представлены результаты эксперимента по влиянию внешнего электрического поля на проводимость вдоль интерфейса двух полимеров.

На первом этапе была поставлена задача определение типа носителей зарядов в исследуемой структуре, для этого были изготовлены структуры типа «полевой транзистор». В качестве затвора использовался кремний р-типа, слой окисла на поверхности которого использовался в качестве подзатворного диэлектрика, а граница раздела двух пленок в качестве канала транзистора. На полученных структурах измерялись выходные и передаточные характеристики структуры (рис. 7).

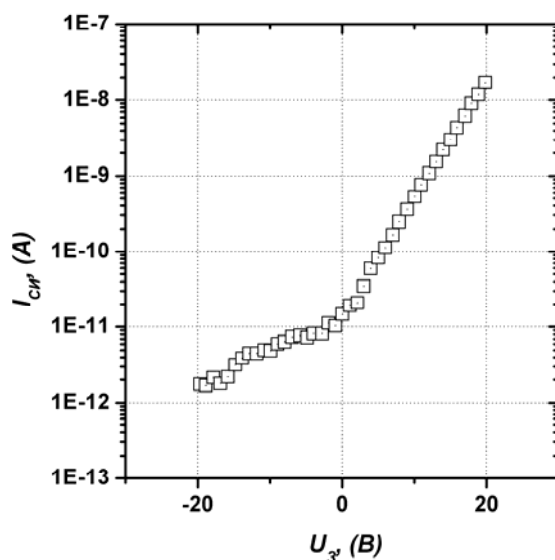
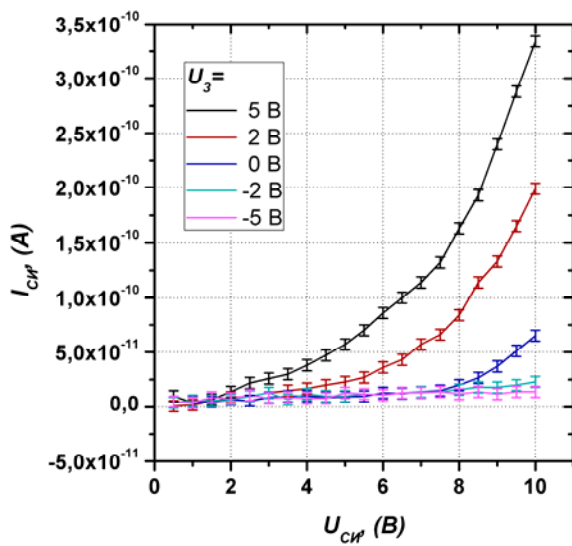


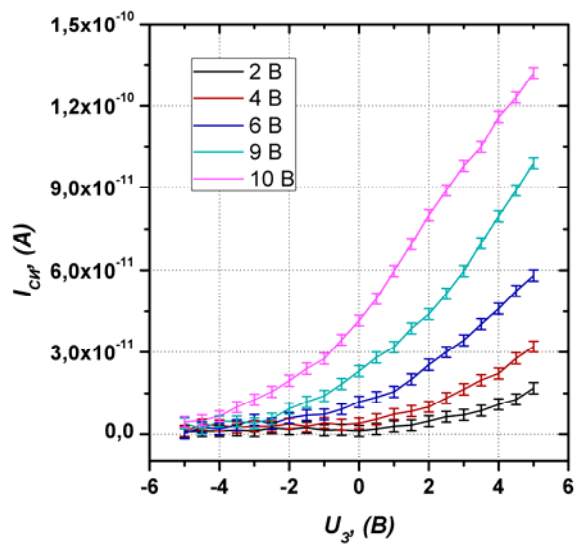
Рисунок 7. Передаточные характеристики структур в конфигурации полевого транзистора.

Вид кривой передаточной характеристики свидетельствует о том, что с увеличением положительного потенциала на затворе происходит рост проводимости в канале транзистора. Такой тип поведения выходных характеристик соответствует транзисторам с электронным транспортом в канале.

Учитывая тот факт, что пленки полимеров этого класса, при толщинах больше некоторой критической (~ 1 мкм), обладают диэлектрическими свойствами, можно существенно упростить технологию изготовления образцов. А именно, использовать полимера и для формирования канала и в качестве материала для подзатворного диэлектрика.



a



б

Рисунок 8. Электрические характеристики исследуемых структур: (а) Выходные характеристики (на вставке приведены напряжения на затворе), (б) передаточные характеристики (на вставке приведены напряжения сток- исток).

Электрические характеристики полученных структур, были измерены при комнатной температуре по схеме с общим истоком. На рисунке 8а представлены типичные выходные характеристики (зависимость тока стока от напряжения сток–исток при фиксированном напряжении смещения на затворе) транзисторных структур. Зависимости имеют нелинейный характер во всем диапазоне приложенных к затвору напряжений. Ток стока увеличивается при положительном потенциале на затворе (рис. 8б).

Полученные характеристики типичны для нормально открытого полевого транзистора, т.е. канал проводимости, сформирован изначально в процессе изготовления образца. Тот факт, что ток в цепи стока уменьшается при отрицательном напряжении на затворе, говорит об электронном типе проводимости канала. Это наблюдение хорошо согласуется с ранее исследованными структурами, изготовленными на кремниевых подложках.

На основе полученных данных была произведена оценка полевой подвижности носителей заряда по следующей формуле:

$$I_c = \frac{W}{L} \mu C_i (U_3 - U_{II}) U_{CI}, \quad (2)$$

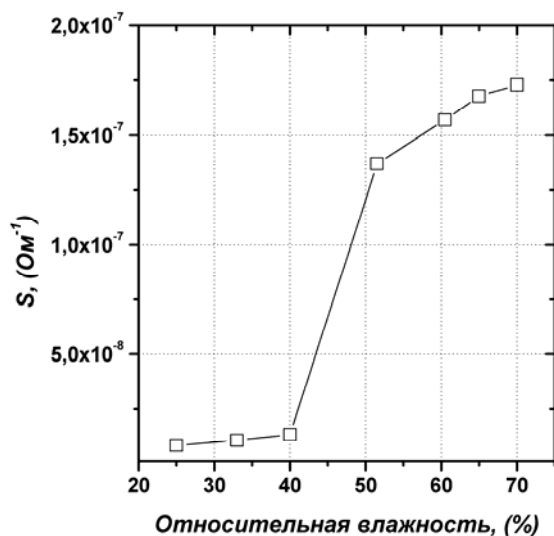
где I_c ток между стоком и истоком, W и L ширина и длина проводящего канала соответственно, μ подвижность, C_i емкость диэлектрического слоя, U_3 , U_{CI} и U_{II} напряжение на затворе, истоке и пороговое напряжение соответственно. Подвижность, рассчитанная по формуле (2), составила $\sim 4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Полученные значения более чем на четыре порядка выше по сравнению с подвижностью электронов в объеме этого полимера (10^{-7} - $10^{-6} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), для отдельных образцов на кремниевой подложке, подвижность достигала рекордных значений $10^2 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

В параграфе 5.2 продемонстрирована высокая чувствительность свойств структур содержащих интерфейс полимер/полимер к различным параметрам, таким как влажность окружающего воздуха, содержанию паров спирта и кислотности pH среды.

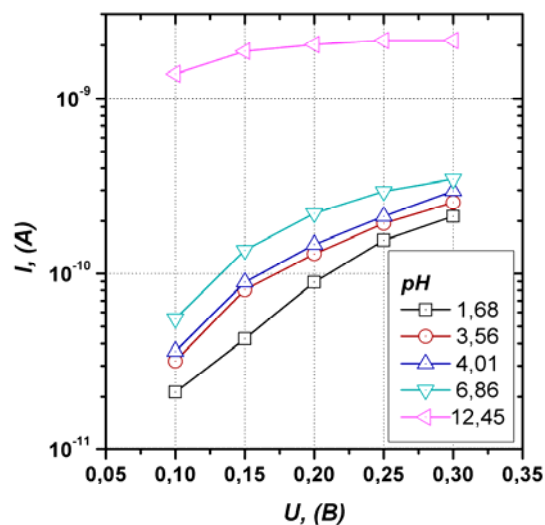
На первом этапе было показано, что проводимость исследуемых структур сильно зависит от количества содержащихся в атмосфере паров воды. Типичная зависимость проводимости от относительной влажности показана на рисунке 9а. Относительное изменение проводимости достигает 5 порядков.

Такое поведение структуры связывалось с особенностями строения используемых полимеров – наличия связи $=\text{CO}$, обуславливающая взаимодействие с веществами содержащими гидроксильные группы. В таком случае проводимость структур должна быть также чувствительна и к параметру pH . Проведение соответствующих исследований подтвердили это предположение, на рисунке 9б представлены зависимости проводимости структур содержащих границу интерфейс полимер/полимер от кислотности состава нанесенного на поверхность второй полимерной пленки.

Исследование времени отклика системы на изменение влажности показало очень малое значение (менее 5 секунд), что не характерно для сенсоров основанных на механизме диффузии. Такое поведение скорее свойственно сенсорам на основе полевых транзисторов.



а



б

Рисунок 9. Сенсорные свойства структур, содержащих границу раздела двух полимерных пленок: а) Зависимость проводимости, от относительной влажности; б) Зависимость проводимости от показателя pH среды;

В параграфе 3.1 было показано, что одним из факторов, определяющим свойства исследуемых структур, является материал электрода. Соответственно, этот же фактор может влиять и на чувствительность системы. Для проверки этого предположения были изготовлены сенсорные структуры с различными материалами электродов, в частности: медь, золото, алюминий, серебро, хром. По результатам анализа измерений видно, что, подбирая материал электрода можно в широком диапазоне варьировать свойства сенсорной системы.

Кроме веществ содержащих группу $-OH$, проверялась чувствительность и на другие вещества, в частности бензин, толуол, ацетон и т.д. Как и ожидалось, в этом случае влияния на проводимость не наблюдалось.

В параграфе 5.3 предложена возможная модель формирования высокопроводящей области вдоль границы раздела двух полимерных диэлектриков, охватывающая все экспериментальные результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На границе раздела двух диэлектрических полимерных пленок формируется область толщиной менее 15 нм, обладающая высокой по сравнению с объемной электропроводностью.
2. Граница раздела двух полимерных диэлектриков имеет металлический тип проводимости.
3. Возникновение высокопроводящей области на границе раздела, обусловлено слоем упорядоченных боковых групп на поверхности пленки первого материала.
4. Установлено, что носителями зарядов в исследованной структуре являются электроны, подвижность которых достигает рекордных для органических электропроводящих материалов значений ($\sim 4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$).
5. Существует принципиальная возможность использования границы раздела двух диэлектрических полимерных пленок в качестве транспортного канала органического полевого транзистора и чувствительного элемента химического сенсора.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ:

1. А.Р. Юсупов, А.Н. Лачинов, Р.Б. Салихов, Р.Г. Рахмеев, **Р.М. Гадиев**. О транзисторном эффекте в вертикальной структуре с несопряженным полимером в качестве транспортного слоя. // ФТТ, 2009, Т.51, вып. 11, С. 2265-2268.
2. **Р.М. Гадиев**, А.Н. Лачинов, В.М. Корнилов, Р.Б. Салихов, Р.Г. Рахмеев, А.Р. Юсупов. Аномально высокая проводимость вдоль интерфейса двух полимерных диэлектриков. // Письма в ЖЭТФ, 2010, 90 (11) , С. 821.
3. R.B. Salikhov, A.N. Lachinov, R.G. Rakhmeyer, and **R.M. Gadiev**. High Conductivity of the Interface Between Two Dielectric Polymer Films. // Mol. Cryst. Liq. Cryst., 2011, Vol. 535, P. 74–81.

Статьи, опубликованные в научных журналах:

4. Р.М. Гадиев, В.М. Корнилов, А.Р. Юсупов. Двумерный электронный газ на границе органических диэлектриков. // Нанотехнологии: Наука и производство, 2009, 3(4), С. 49-53.
5. А.Р. Юсупов, Р.М. Гадиев. Особенности свойств транзистора вертикального типа на основе несопряженного полимера. // Нанотехнологии: Наука и производство, 2009, 3(4), С. 71-75.
6. А.Н. Лачинов, К.Н. Югай, Р.М. Гадиев, В.М. Корнилов. Аномально высокая проводимость границы раздела между полимерными пленками полидифениленфталида. // Нанотехнологии, 2010, 1(6), С. 10-14.
7. Р.Б. Салихов, А.Н. Лачинов, Р.Г. Рахмеев, Р.М. Гадиев, А.Р. Юсупов, С.Н. Салазкин. Химические сенсоры на основе нанополимерных пленок. // Измерительная техника, 2009, № 4, С.62-64.

Статьи, опубликованные в сборниках трудов:

8. Р.Г. Рахмеев, Р.М. Гадиев, А.Р. Юсупов. Перенос заряда в наноструктурах Si/полимер. // Сб. трудов XII Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых, Новосибирск, 2006, С. 162.
9. Р.М. Гадиев. Проводимость полимерных пленочных структур. // Сб. статей Конкурса научных работ студентов ВУЗов РБ, Уфа, 2007, С. 17.
10. Р.Г. Рахмеев, Р.М. Гадиев, А.Р. Юсупов. Исследование транспорта носителей заряда в наноструктурах Si/полимер. // Сб. «Современные проблемы физики и физико-математического образования» V Уральская региональная научно- практическая конференция, Уфа, 2006. С.112-113.
11. Р.Б. Салихов, А.Н. Лачинов, Р.Г. Рахмеев, Р.М. Гадиев. Транспортный слой на границе раздела полимерных пленок. // Сб. трудов VI Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт- Петербург, 2008, С. 68.
12. Р.М. Гадиев, А.Н. Лачинов, Р.Б. Салихов, Р.Г. Рахмеев. Проводимость интерфейса полимер/полимер. // Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых, Уфа, 2008, С. 182.
13. Р.М. Гадиев, Р.Б. Салихов, Р.Г. Рахмеев. Проводимость вдоль границы раздела двух полимерных пленок. // Сборник «Физика диэлектриков» Материалы XI Международной конференции «Диэлектрики – 2008» Т.1., Санкт–Петербург, 2008, С.353-355.
14. Р.М. Гадиев. Транспортные свойства органико - органического интерфейса, - Сб. статей IX Молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС – 9). Екатеринбург, 2008, С. 74-76.
15. Р.М. Гадиев, Р.Б. Салихов, Р.Г. Рахмеев. Проводимость вдоль границы раздела полимерных пленок. // Сб. научных статей физико-математического факультета: Ученые записки, Вып.9, Уфа, 2008, С.38-40.

16. Р.М. Гадиев, Р.Б. Салихов, А.Н. Лачинов, Р.Г. Рахмеев, А.Р. Юсупов. Полимерные химические сенсоры. // Сб. научных статей физико-математического факультета: Ученые записки. Вып.10, Уфа, 2009, С. 49-55.
17. А.Р. Юсупов, А.Н. Лачинов, А.Р. Тамеев, Р.Г. Рахмеев, Р.Б. Салихов, Р.М. Гадиев. Исследование подвижности носителей заряда в многослойных структурах на основе полидифениленфталида, времяпролетным методом. // Сб. научных статей физико-математического факультета: Ученые записки. Вып.11, Уфа, 2010, С. 165-170.
18. Р.Г. Рахмеев, А.Н. Лачинов, Р.М. Гадиев, Р.Б. Салихов. Управление проводимостью интерфейса полимер/полимер. // Сборник трудов VII Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт- Петербург, 2010, С.181-182.
19. Р.М. Гадиев, В.М. Корнилов, Р.Б. Салихов, А.Р. Юсупов, Р.Г. Рахмеев, А.Н. Лачинов. Аномально высокая проводимость вдоль границы раздела двух полимерных пленок. // Сборник трудов VII Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт- Петербург, 2010, С.191-192.